第 38 卷第 11 期 生 态 学 报 Vol.38,No.11
2018 年 6 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jun.,2018

DOI: 10.5846/stxb201704300790
李喜霞,杜天雨,魏亚伟,周永斌.阔叶红松林生态化学计量学特征及其对纬度梯度的响应.生态学报,2018,38(11):3952-3960.
Li X X, Du T Y,Wei Y W,Zhou Y B.Characteristics of ecological stoichiometry in broad-leaved and Korean pine mixed forest and its response to latitude gradient in Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3952-3960.

阔叶红松林生态化学计量学特征及其对纬度梯度的响应

李喜霞[1,*],杜天雨[2],魏亚伟[2,3],周永斌[2]
1 沈阳农业大学 理学院,沈阳 110866
2 沈阳农业大学 林学院,沈阳 110866
3 辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站,昌图 112500

摘要:为研究红松叶片的养分及生态化学计量学特征的空间分布及其影响因素,依据我国温带阔叶红松林的分布特点,沿纬度梯度,选取长白山(42°27′N)、张广才岭(44°16′N)和小兴安岭(48°05′N)等 3 个地区的典型阔叶红松老龄林,测定红松叶片碳(C)、氮(N)、磷(P)含量,及表层土壤(0—15 cm)、中层土壤(15—30 cm)的有机碳(SOC)、全氮(TN) 和全磷(TP)含量,分析了其分布特征及其相互关系。结果表明:1)红松叶片 C、N、P 含量显著高于土壤。表层土壤 C、N、P 含量变化范围分别为 27.6—87.4,2.0—7.2 mg/g 和 0.26—0.92 mg/g;中层土壤为 8.1—59.7,0.7—4.6 mg/g 和 0.2—0.82 mg/g;而叶片为 495.5—507.4,12.7—172.5 mg/g 和 1.1—2.1 mg/g。2)土壤中的 SOC、C/N、C/P 均随纬度升高极显著增加,而叶片各元素计量特征随纬度的变化不显著。3)叶片 N、P 含量分别与土壤 N、P 含量显著正相关,同时,叶片 N 与土壤 C/N、P 与土壤 N/P 显著相关。相比较而言,红松叶片 N、P 含量较低,这可能说明阔叶红松林土壤 N、P 供应不足,而叶片 N/P 仅为 9.9,说明东北阔叶红松林 N 限制更加明显。本研究为阐明东北温带阔叶红松林的养分供应状况和限制因素,为阔叶红松林区提高红松生产力的管理措施的提出奠定了基础。

关键词:生态化学计量学特征;纬度梯度;红松;阔叶红松林;东北地区

Characteristics of ecological stoichiometry in broad-leaved and Korean pine mixed forest and its response to latitude gradient in Northeast China

LI Xixia[1,*], DU Tianyu[2],WEI Yawei[2,3],ZHOU Yongbin[2]
1 *College of Science*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
2 *College of Forestry*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
3 *Research Station of Liaohe River Plain Forest Ecosystem*, *Chinese Forest Ecosystem Research Network*, *Changtu* 112500, *China*

Abstract: Aims of this study is to explore the spatial distribution of nutrients and the ecological stoichiometry in leaves of Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) and identify the driven factors. According to the distribution range of broad-leaved and Korean pine mixed forest (BKF) in Northeast China, this study sampled 3 sites in Changbai Mountain (42°27′N), Zhangguangcai Mountain (44°16′N) and Xiaoxing′anling Mountain (48°05′N), and measured carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in top soil (0—15 cm), subsurface soil (15—30 cm) and Korean pine leaves, determined spatial variation of nutrient elements along a latitude gradient and the relationships between leaves and soil. The results showed that: 1) the contents of C, N and P in leaves were significantly higher than those in soil. The range of C, N, and P

基金项目:林业公益性行业专项(201304216);"十二五"农村领域国家科技支撑计划专题(2012BAD22B040206)
收稿日期:2017-04-30; **网络出版日期**:2018-03-02
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xixiali@ 126.com

in the top (0—15 cm) soil were 27.6—87.4, 0.26—0.92 mg/g, and 2.0—7.2 mg/g, respectively, in subsurface (15—30 cm) soil were 8.1—59.7 mg/g, 0.7—4.6 mg/g, and 0.2—0.82 mg/g, respectively. While, in leaves, were 12.7—172.5 mg/g, 1.1—2.1 mg/g, and 495.5—507.4 mg/g. 2) The organic carbon and C/P and C/N in soil significantly increased along a latitude gradient. The correlation between the elements in leaves and latitude was not significant. 3) Leaves N, P was significantly correlated with total N and P in top soil respectively, additionally, leaves N was significantly correlated with that C/N in top soil, leaves P with N/P in top soil. Comparatively, the contents of N, P in Korean pine leaves are lower than that in natural forest ecosystems along the North-South Transect of Eastern China, which might suggest nutrients supply is not enough to Korean pine growth. Furthermore, low leaves N/P (9.9) indicated N limit is stronger than P in BKF. The results clarify the nutrient supply conditions and their influence factors in BKF, and are helpful to put forward effectively management way to increase forest productivity.

Key Words: ecological stoichiometry characteristics; latitude gradient; Korean pine; broad-leaved Korean pine forest; Northeast China

随着现代生态学的快速发展,生态化学计量学已成为生态学研究的热点,受到了国内外学者的广泛关注[1]。生态化学计量学(ecological stoichiometry)是结合了生物学、化学和物理学等基本原理,研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡的科学[2-5]。近年来,生态化学计量学在全球与区域、功能群及生态系统、个体水平等不同尺度展开了大量的研究[1]。其中,大多数研究是针对不同生态系统中植被和土壤 C、N、P 生态化学计量特征的空间分布格局展开的。在垂直的海拔梯度上,土壤有机碳和全氮含量、C/P、N/P 随海拔梯度线性增加或先增后降[6-8],而植物 N 含量、C/N 随海拔增加先升高再降低,P 含量则是随海拔先降低再增高;土壤和植物 C/N、C/P 和 N/P 在不同生态系统中的垂直分布格局有所不同,其结果与温度、降水、海拔和土壤受 N、P 元素的限制有关[6-7]。而垂直剖面上,土壤有机碳、全氮和全磷含量均随土层深度的增加而下降[9],土壤 C/N、C/P、N/P 比值随土壤剖面深度向下递减[10]。在纬度梯度上,Reich 和 Oleksyn [11]在对全球 452 个样点的 1280 种植物叶片的分析中发现,植物叶片的氮、磷含量随纬度的升高显著增加,而随温度的升高显著降低。而 Kerkhoff 等[12]对全球尺度 1054 种植物叶片养分含量的研究中发现,温度和纬度变化对植物叶片氮含量无显著影响,叶片磷含量随温度降低呈指数增加而随纬度变化不显著;叶片中 N/P 随纬度降低而变小,而 C/P 随纬度升高而变小。Kang[13]和 Wu[14-15]分别在对欧洲云杉和我国栎属植物叶片的研究中发现,叶片养分含量与经纬度存在着二次曲线关系。Han 等[16]对中国陆地 127 个点 753 物种叶片氮、磷化学计量特征的研究发现,叶片氮、磷含量与纬度呈正相关关系,而 N/P 随纬度降低却不显著。而我国小区域的研究主要集中在黄土高原等干旱地区,其中李婷等[17]对黄土高原植物与土壤的研究结果表明,随着纬度的升高,植物叶片 C 含量、C/N、C/P 随之降低,N、P 含量随之升高,与张向茹等[18]对黄土高原刺槐林土壤的研究结果相同土壤各层 C、N 含量、C/N、N/P 随纬度升高均呈指数减小,P 含量呈先增加后减少。而在曾全超等[19]对陕北黄土高原土壤的研究中,土壤有机碳、全氮、全磷均随着纬度的增加逐渐降低,土壤 C/P、N/P 则随着纬度的升高显著下降。以上结果可见,对于不同纬度上植物、土壤的生态化学计量特征变化的研究较少,且其在区域尺度上的研究主要针对黄土高原地区的人工林,对不同环境下的各类森林系统的研究还不够全面。

阔叶红松林是我国东北东部山区的地带性顶极植被类型[20]。目前对于阔叶红松林的相关研究已有所报道,但主要集中于不同群落土壤理化性质比较[21]、细根的化学计量特征和生物量[22-23]、不同演替阶段土壤酶活性和养分特征[24]等方面,而从生态化学计量学角度对不同纬度梯度下阔叶红松林土壤和叶片的相关研究还未见报道。本文以阔叶红松林为研究对象,通过比较不同纬度阔叶红松林内红松土壤和植物叶片 C、N、P 生态化学计量特征的变化,分析叶片和土壤元素的相关关系,探讨阔叶红松林中红松的养分分配格局和红松对不同纬度条件下的适应机制,以期为阐明阔叶红松林养分利用状况提供数据支持。

1 研究地区概况和研究方法

1.1 样地选择和研究区概况

在我国最具代表性的天然阔叶红松林的典型分布区,按照纬度从南到北,选择长白山的露水河、张广才岭的穆棱和小兴安岭的五营等 3 个地点作为研究区(表 1)。优势树种包括红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、核桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim)等,在穆棱和小兴安岭,针叶树还包含少量的云杉(*Picea* spp),和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)。红松是阔叶红松林中的比例最高的针叶树种,占林分蓄积比例的 23%—46%。3 个研究区属于温带大陆性气候,年均温从 4.9℃到 1.8℃之间,降雨量在 550—700 mm 之间,土壤属于暗棕色森林土(表 1)。

表 1 研究区域地理概况及基本气候信息

Table 1 Sample sites information

采样点 Sites	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	年均温 Mean annual temperature/℃	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	土壤类型 Soil type	主要树种 Main species
露水河	42°27′	127°52′	3.7	694	暗棕色森林土	红松、紫椴、水曲柳、蒙古栎、核桃楸等
穆棱	44°16′	130°10′	4.9	550	暗棕色森林土	红松、红皮云杉、臭冷杉、水曲柳和蒙古栎等
五营	48°05′	129°11′	1.8	666	暗棕色森林土	红松、红皮云杉、臭冷杉、紫椴、水曲柳等

1.2 研究方法

1.2.1 样本采集与处理

在 2015 年 7—8 月的树木生长旺季,在 3 个样点,选择人类干扰小的老龄林进行了野外调查和样品采集。在每个样点设置 7 块面积为 20 m×20 m 的样地,在样地内选择 3 棵生长良好、长势相近的红松个体,按照不同树冠层次(顶部、中部和下部)和不同方位(东、西、南和北),摘取成熟叶片 3—5 束,然后将同一棵树的叶片按层次和方位等数量混合。在每块样地内采取 5 个点(样地中心和四角)的表层(0—15 cm) 和中层(15—30 cm)土壤,混成一个样品。将采集的土壤、植物放入做好标记的自封袋中带回实验室。土壤样品风干研磨过 100 目筛,以备养分分析。叶片和土壤有机碳(SOC)的测定采用重铬酸钾-外加热法[25];全氮(TN)的测定采用凯氏定氮法[26];全磷(TP)的测定采用钼锑抗比色法[27]。

1.2.2 数据处理

采用单因素方差分析和 LSD 多重比较对不同纬度下阔叶红松林中红松土壤和叶片各化学计量特征进行分析,采用 Pearson 相关法分析红松叶片、土壤有机碳、全氮、全磷含量及 C∶N、C∶P、N∶P 化学计量比各组分之间、及其与纬度的相关关系。

2 结果与分析

2.1 土壤 C、N、P 含量及沿纬度变化

表层(0—15 cm)土壤有机碳(SOC)含量变化范围为 27.6—87.4 mg/g,其中露水河、穆棱、五营等地的平均值分别为 45.95、56.01 mg/g 和 77.00 mg/g。且 SOC 含量与纬度显著正相关($P < 0.01$)。土壤全氮(TN)和全磷(TP)含量变化范围为 2.0—7.2 mg/g 和 0.3—0.9 mg/kg,但与纬度关系不明显(图 1)。相比较而言,穆棱地区土壤元素变异最大,SOC、TN 和 TP 含量最高和最低值均出现在该样点。土壤 C/N、C/P、N/P 的变化范围分别为 11.49—15.88、55.36—174.53 和 4.04—11.93,其中 C/P、N/P 随纬度的升高呈显著上升趋势(图 1)。

与表层土壤一致,中层(15—30 cm)SOC 含量变化范围为 8.1—59.7 mg/g,其中露水河、穆棱、五营等地的

平均值分别为 14.71、30.95 mg/g 和 32.51 mg/g。并且 SOC 含量与纬度极显著正相关($P < 0.01$)。土壤 TN、TP 含量变化范围分别为 0.8—4.6 mg/g 和 0.2—0.8 mg/g,两者随纬度升高的变化趋势不显著。与表层土壤相同,中层土壤中的 SOC、TN、TP 含量的最高和最低值均位于穆棱地区,且最高值位于穆棱高纬度地区,而最低值位于低纬度地区,则说明穆棱各采样点间土壤元素含量变异较大。土壤 C/N、C/P 和 N/P 变化范围分别为 9.22—15.01、35.27—112.73 和 3.67—8.48,其中 N/P 随纬度的升高呈明显的上升趋势(图 1)。

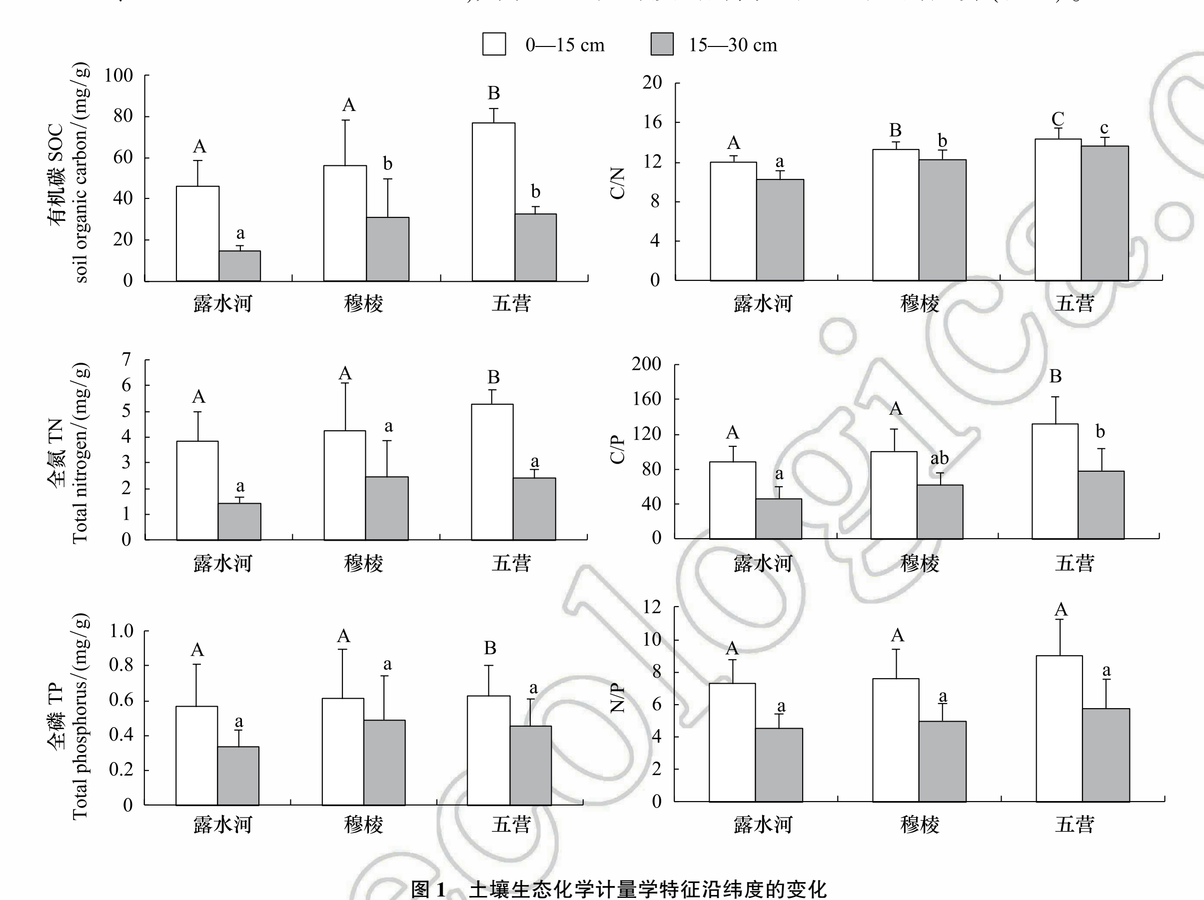


图 1　土壤生态化学计量学特征沿纬度的变化

Fig.1　Dynamic of eco-stoichiometry characteristics in soil along a latitude gradient

不同字母表示同一土层不同纬度间差异显著($P < 0.05$)

2.2　红松叶片生态化学计量学特征沿纬度变化

红松叶片有机碳(C)、氮(N)、磷(P)含量变化范围分别为 495.5—507.4,12.7—17.3、1.1—2.1 mg/g(图 2)。其中露水河、穆棱、五营的红松叶片 C 含量平均值分别为 500.48、503.96、501.79 mg/g,N 含量平均值分别为 14.99、14.11、14.17 mg/g,叶片 P 含量平均值分别为 1.57、1.5、1.44 mg/g。红松叶片 C、N、P 含量随纬度的变化均不显著。叶片 C/N(26.37—28.75)、C/P(235.14—350.1)和 N/P(8.13—13.76)随纬度升高变化不显著(图 2)。

2.3　红松叶片化学计量学特征与土壤养分的关系

叶片 C 含量与土壤各养分元素含量相关关系不显著(表 2)。叶片 N 含量与表层(0—15 cm)土壤 TN 呈显著正相关,而与表层土壤 C/N 呈极显著负相关关系;叶片 P 含量与表层 、中层(15—30 cm)土壤 TP 含量、C/P 和 N/P 均表现显著相关关系,其中与表层 、中层土壤 TP 含量呈正相关,而与土壤 C/P、N/P 显著负相关。表层和中层土壤与叶片 C/P、N/P 相关性表现相似,叶片 C/P 与土壤全磷、C/P 呈负相关,而与 N/P 呈显著正相关关系;叶片 N/P 与土壤 C/P 和中层土壤 N/P 呈正相关关系,与表层土壤 N/P 呈极显著正相关(表 2)。

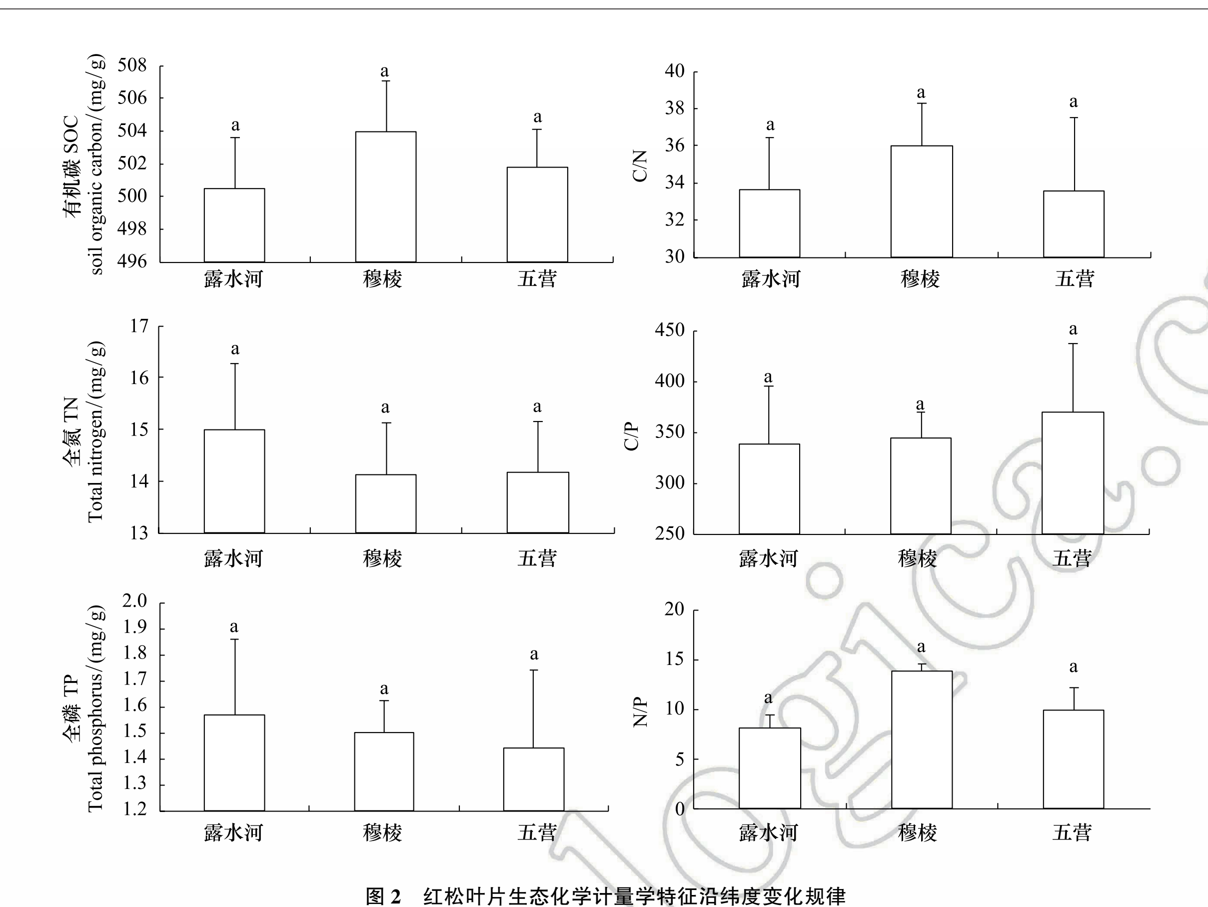


图 2 红松叶片生态化学计量学特征沿纬度变化规律

Fig.2 the trend of eco-stoichiometry characteristics in *Pinus koraiensis* leaf along the latitude gradient

不同字母表示同一土层不同纬度间差异显著(P<0.05)

表 2 植物叶片与土壤 C、N、P 含量及其计量比之间的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between plant leaf and topsoil C,N,P contents and stoichiometry

		表层土壤 Top soil(0—15 cm)						中层土壤 Subsurface soil(15—30 cm)					
		SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P	SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
叶片 Leaf	C	0.095	0.032	−0.162	0.201	0.315	0.301	0.195	0.136	0.051	0.348	0.207	0.106
	N	0.228	0.447*	−0.348	0.633*	0.224	0.016	0.152	0.265	0.182	0.396	−0.079	0.084
	P	0.121	0.150	0.530*	−0.097	−0.568**	−0.627**	0.129	0.181	0.482*	−0.121	−0.524*	−0.577*
	C∶N	−0.321	−0.390	−0.104	0.087	−0.301	−0.369	−0.190	−0.198	0.016	−0.047	−0.403	−0.417
	C∶P	−0.119	−0.152	−0.500*	0.120	0.555*	0.601**	−0.153	−0.213	−0.500*	−0.141	0.554*	0.599**
	N∶P	−0.030	0.055	−0.366	−0.234	0.463*	0.652**	−0.079	−0.082	−0.438	−0.066	0.550*	0.695*

* P <0.05; ** P<0.01, n =21

2.4 与其他区域的对比

与全球和中国等不同尺度的研究结果相对比,本研究区域红松叶片碳含量平均值(502.2 mg/g)比全球陆生植被高出 8.8%,而比中国东部南北样带森林生态系统其他区域植物高 4.6%(表 3)。在与中国区域和全球尺度的数据库的比较中发现,本研究中叶片氮含量为 14.4 mg/g,明显低于中国陆生植物(20.2 mg/g)和全球陆生植物(20.1 mg/g),也比中国东部南北样带陆生植物低 17.7%,比中国东部南北样带森林系统植物低 21.3%(表 3)。红松叶片 P 含量为 1.50 mg/g,与中国陆生植物的 1.46 mg/g 结果差异不显著,而和中国东部南北样带陆生植物相比,叶片 P 含量相对较高,而与全球陆生植物磷含量相比却较低,同时比中国东部南北样带森林生态系统植物低 25%(表 3),红松叶片 C/N、C/P 为 34.56 和 350.1,均高于中国东部南北样带森林生态系统植物的 29.1 和 313.9,N/P 只有 9.9,明显比其他生态系统植物低(表 3)。

表 3　中国主要陆生植物及全球植物 C、N、P 及计量学特征对比

Table 3　Stoichiometry of C, N, P and C/N、C/P、N/P in terrestrial soil of China and Global flora

研究对象 Objects	C 含量 C content/ (mg/g)	N 含量 N content/ (mg/g)	P 含量 P content/ (mg/g)	C/N	C/P	N/P	参考文献 References
中国东部南北样带森林生态系统植物 Trees in NSTEC	480.0	18.3	2.0	29.1	313.9	11.5	[27]
中国东部南北样带陆生植物 Plant in NSTEC	—	17.5	1.28	—	—	13.5	[28]
中国陆生植物 Terrestrial plant in China	—	20.2	1.46	—	—	16.3	[16]
全球陆生植物 Global terrestrial plant	461.6	20.1	1.77	—	—	13.8	[28-29]
全球陆生植物 Global terrestrial plant	—	20.6	1.99	—	—	12.7	[30]
阔叶红松林 BKF	502.2	14.4	1.50	34.56	350.1	9.9	—

NSTEC: North-South Transect of Eastern China; BKF: broad-leaved and Korean pine mixed forest

阔叶红松林 0—15 cm 土壤 C/N、C/P、N/P 均显著高于我国陆地土壤,且 C/P、N/P 也均显著高于我国森林土壤;15—30 cm 土壤 C/N 高于全球草地土壤,而低于我国和全球的陆地、森林土壤,且其中与我国森林土壤差异最大(表 4)。

表 4　中国及全球主要陆地土壤 C、N、P 计量学特征对比

Table 4　Stoichiometry of C/N、C/P and N/P in terrestrial soil of China and Global flora

研究对象 Objects	C/N	C/P	N/P	参考文献 References
中国陆地土壤 Terrestrial soil in China	12.30	52.70	3.90	[31]
中国森林土壤 Forest soil in China	13.70	44.50	3.20	[32]
全球陆地土壤 Global terrestrial soil	12.30	72.00	5.90	[33]
全球森林土壤 Global forest soil	12.40	81.90	6.60	[33]
全球草地土壤 Global grass soil	11.80	64.30	5.60	[33]
阔叶红松林 0—15 cm Top soil in BKF	13.19	105.53	7.89	—
阔叶红松林 15—30 cm Subsurface soil in BKF	11.97	61.45	5.05	—

3　讨论

3.1　叶片及土壤养分化学计量特征

相对于不同尺度的其他区域,阔叶红松林中红松叶片 C 含量较高(表 3),说明该区域植物有机物含量较高,进而可以推断该生态系统可能具有较高的碳蓄积能力[27]。

本研究区域内红松林植物叶片 N 含量较全球和中国陆生植物 N 含量平均值均偏低(表 3),这可能与该区域相对较低的温度有关。在 Reich 和 Oleksyn 提出的温度-生物地球化学假说中,低温会影响植物的某些物理特性(如细胞膜的渗透性),进而影响着植物一系列的新陈代谢过程,从而降低植物对于土壤中 N 的吸收,导致植物叶片氮含量偏低。另外,土壤中能被植物吸收并利用的是有效态氮(如硝态氮和氨态氮),而在土壤生态系统的氮循环过程中土壤微生物和土壤酶[34-35]均起着重要的驱动作用,土壤微生物通过氨化、硝化和反硝化等作用将土壤内颗粒态有机氮转化成可溶性有机氮,而土壤酶作为催化剂,也参与了土壤中的复杂生化作用[36]。土壤环境中的温度对于土壤微生物和土壤酶而言十分重要,它决定着两者的活性和数量,而本研究的研究区域平均温度相对较低,造成土壤中的微生物和土壤酶数量和活性相对较低,各转化作用也不同程度的随之而降低,这就可能间接导致该地区土壤氮含量的偏低和植物对氮的吸收不足。

本研究中叶片 P 含量比全球低(表 3),可能主要是由于本研究选择的森林大部分为顶级群落,林木生长

旺盛,又有腐殖层覆盖,导致该地岩石和土壤的风化作用相对较弱,而土壤中 P 又主要为岩石母质风化所得,土壤中的 P 含量供应不足,所以红松叶片较全球陆生植物来说 P 含量较低。另外,红松叶片相对于其他植物凋落物量较少,且该地区年均温度相对较低,其有机物分解过程相对较慢,这也可能导致土壤中可供植物吸收的有效磷供应不足。

红松叶片 C/N,C/P 均高于中国东部南北样带森林植物(表 3),这主要是因为红松叶片含 C 量较高。而叶片 N/P 比中国陆生植物 N/P 低了 39.2%,比全球陆生植物低了 28.2%和 22.1%。叶片的 N/P 化学计量特征受环境和植物的共同影响,决定了植物特定的生长策略,表征植物氮磷限制状况(N/P<14 为 N 限制,N/P>16 为 P 限制)[20]。本研究中,红松叶片 N/P 小于 14,进而推测本区域内红松的生长可能受 N 元素限制。这与以往研究者的温带和北方森林的生长可能受氮限制的结果相同[37]。

本研究地区表层土壤 C/N、C/P、N/P 相对于我国其他地区非森林土壤和全球陆地土壤均偏高,且其中 C/P、N/P 差异较大(表 4)。而下层土壤 C/N、C/P、N/P 均低于表层土壤,这一现象可能是因为有机碳大量聚集于土壤表层,且有机碳大部分为难溶性物,较难向下移动,所以中层有机碳含量显著小于表层,而中层土壤中 N、P 含量虽较表层低,但受降雨等影响较小,相对上层减少不多,导致中层 C/N、C/P、N/P 与表层差异相对较小。

3.2 阔叶红松林化学计量特征与纬度相关关系

红松表层和中层土壤 C、N、P 含量随纬度的变化表现相同,其中,表、中层 SOC 含量与纬度相关性均表现为显著正相关(P <0.05)。张向茹等[18]在对黄土高原刺槐林土壤生态化学计量特征的研究中指出,随纬度的升高,SOC、TN 均随纬度的升高指数减小,而 TP 含量无明显变化,与本研究结果差异较大。这可能是因为两研究点的环境差异明显,黄土高原地区随纬度升高降水量减少,而阔叶红松林所处气候条件相对湿润,这可能对植物的养分利用和循环产生不同影响。本研究中随着纬度增加,温度先增加后略有降低,低纬度地区随着温度增加,土壤微生物的活动也逐渐活跃,促使了 SOC 的积累,而在高纬度地区采样点海拔的降低减缓了温度的降低趋势,所以 SOC 含量随纬度升高而增加但其在高纬度区域变化不显著。土壤中 N 元素主要来自植物对 N 素的固定、凋落物的分解,同种植物叶片中 N 元素差异较小,则凋落物向土壤输送的元素在区域内的差异较小,所以阔叶红松林土壤中氮元素随纬度的变化也不显著。土壤 P 元素主要来源于岩石的风化,而在区域尺度上土壤的风化程度差异较小,且阔叶红松林均为暗棕色森林土,所以土壤全磷含量随纬度的变化表现不显著。表层和中层土壤 C/N、C/P 都随纬度升高显著增加(P <0.01),而 N/P 随纬度升高不显著,这是由于红松林土壤 TN、TP 含量随纬度变化不显著,而 SOC 含量随纬度增加而增加,从而导致 C/N、C/P 随纬度的增高,而土壤中 N、P 含量随纬度变化相同且均不显著,所以土壤 N/P 随纬度也无明显变化。由以上结果可以推断,纬度对 SOC 及 C/N、C/P 的变化具有重要影响[19],且阔叶红松林中元素随纬度的变化主要受温度因素的影响。

红松叶片 C 含量随纬度升高先增高后降低,这一变化与年均温度的变化相同,与降水变化相反,这主要是因为,随着温度的升高,降水的减少,为适应干旱环境,植物会增加自身碳含量较高的组织的比例(如木质素),以保护植物体不受到损伤,所以叶片中 C 含量也随之增加。本文中红松叶片 TN 含量随纬度的升高呈降低趋势,这与相关研究中,植物叶片 N、P 含量随纬度的升高和温度的降低而显著增加[28]的结论不同。叶片 TP 含量随纬度变化较小,可能因为土壤中 P 含量随纬度变化不显著导致。有研究表明,植物叶片 N/P 和 C/P 比随纬度的增加、年均温度的降低而增加,但 C/N 比却随之下降[38]。本研究中,叶片各元素计量比随纬度变化较小,且均未达到显著水平,可能由于叶片中各元素在不同纬度变异性较大,对其变化趋势的表达有很大影响。此外,没有出现与土壤相似的规律,其原因可能与红松树种生长范围梯度较小,且本研究的样本量相对较少有关系,本研究的下一步计划就是增加样本量的进一步研究。

3.3 土壤养分特征与植物叶片化学计量的关系

与红松叶片及土壤 N、P 元素的变化规律相似,在对阿拉善荒漠植物叶片的有关研究中,叶片 N 和 P 的浓

度与土壤 P 含量呈正相关关系[39]。而红松叶片 N 含量只与表层土壤 TN 显著相关,这可能因为本研究区域内土壤 N 含量相对较低,且腐殖层较厚。

植物 C/P、N/P 与土壤各层的相关性一致,则植物养分受不同土层的影响差异不明显。其中叶片 C/P 与土壤全 P 含量显著负相关,且与 N/P 相同,均与土壤 C/P、N/P(极)显著正相关。植物叶片的 C/N 和 C/P 表示植物吸收营养所能同化 C 的能力,可反映植物的养分利用效率[40],与土壤 C/P、N/P 呈正相关,可以推测土壤对于植物的养分利用效率有较大影响。叶片 C、N、P 计量比与土壤 C、N、P 计量比相关系数较 C、N、P 含量之间相关系数大,说明土壤养分含量对植物的影响主要通过生态化学计量比来调节[8]。

4　结论

阔叶红松林土壤有机碳随纬度的升高显著增加,C/N、C/P 的空间分布与有机碳具有一致性。红松叶片 C、N、P 及其化学计量与纬度相关性不显著。叶片 N、P 含量与表层土壤 N、P 含量显著相关,而 C/N 与土壤 N 显著负相关,C/P、N/P 与土壤 P 显著负相关。除叶片 C/P 与土壤全 P 呈显著负相关以外,叶片 C/P、N/P 均与土壤 C/P 呈显著正相关,与土壤 N/P 呈极显著正相关。相对于纬度的影响,红松叶片养分元素含量及计量比主要受土壤的影响。与其他区域相比,红松叶片 N、P 含量较低,这与土壤养分供应不足有关,从叶片 N/P 看,红松受到 N 限制更加明显。

参考文献(References):

[1] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.

[2] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002: 225-226.

[3] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N:P stoichiometry to ecology studies. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(9): 1009-1018.

[4] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems. Acta Phytoecological Sinica, 2005, 29(6): 1007-1019.

[5] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.

[6] Ordoñez J C, van Bodegom P M, Witte J P M, Wright I J, Reich P B, Aerts R. A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility. Global Ecology and Biogeography, 2009, 18(2): 137-149.

[7] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和文祥, 耿增超. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170.

[8] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 王慧杰, 宋成程, 何平, 孙雪娇. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性. 生态学报, 2016, 36(14): 4363-4372.

[9] 周永斌, 郭鑫炜, 魏亚伟, 王茜, 李吉, 李志远, 郑卓然. 辽西北半干旱区典型人工林土壤 C, N, P 的垂直分布特征. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(4): 418-424.

[10] 张友, 徐刚, 高丽, 刘书花, 吕迎春. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义. 地球与环境, 2016, 44(6): 647-653.

[11] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.

[12] Kerkhoff A J, Enquist B J, Elser J J, Fagan W F. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(6): 585-598.

[13] Kang H Z, Zhuang H L, Wu L L, Liu Q L, Shen G R, Berg B, Man R Z, Liu C J. Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in Picea abies across Europe: an analysis based on local observations. Forest Ecology and Management, 2011, 261(2): 195-202.

[14] Wu T G, Yu M K, Wang G G, Dong Y, Cheng X R. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across forty-two woody species in Southeast China. Biochemical Systematics and Ecology, 2012, 44: 255-263.

[15] Wu T G, Dong Y, Yu M K, Wang G G, Zeng D H. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Quercus* species across China. Forest Ecology and Management, 2012, 284: 116-123.

[16] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. The New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[17] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.

[18] 张向茹，马露莎，陈亚南，杨佳佳，安韶山. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究. 土壤学报，2013，50(4)：818-825.

[19] 曾全超，李鑫，董扬红，李娅芸，程曼，安韶山. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. 自然资源学报，2015，30(5)：870-879.

[20] 陈金玲，金光泽，赵凤霞. 小兴安岭典型阔叶红松林不同演替阶段凋落物分解及养分变化. 应用生态学报，2010，21(9)：2209-2216.

[21] 李瑛云，宋森，张艳波，刘邦. 阔叶红松林物种多样性变化对土壤性质的影响. 森林工程，2013，29(4)：24-29，52-52.

[22] 孙清芳，刘滨凡，韩丽冬，李云红，刘玉龙. 阔叶红松林细根分布及周转. 森林与环境学报，2016，36(4)：449-454.

[23] 王晓洁，肖迪，张凯，侯继华. 凉水天然阔叶红松林植物叶片与细根的 N∶P 化学计量特征. 生态学杂志，2015，34(12)：3283-3288.

[24] 孙双红，陈立新，李少博，段文标，刘振花. 阔叶红松林不同演替阶段土壤酶活性与养分特征及其相关性. 北京林业大学学报，2016，38(2)：20-28.

[25] LY/T 1228-1999 森林土壤全氮的测定. 1999.

[26] LY/T 1232-1999 森林土壤全磷的测定. 1999.

[27] 任书杰，于贵瑞，姜春明，方华军，孙晓敏. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征. 应用生态学报，2012，23(3)：581-586.

[28] 任书杰，于贵瑞，陶波，王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学，2007，28(12)：2665-2673.

[29] Huang J Y，Yu H L，Li L H，Yuan Z Y，Bartels S. Water supply changes N and P conservation in a perennial grass *Leymus chinensis*. Journal of Integrative Plant Biology，2009，51(11)：1050-1056.

[30] Elser J J，Fagan W F，Denno R F，Dobberfuhl D R，Folarin A，Huberty A，Interlandi S，Kilham S S，McCauley E，Schulz K L，Siemann E H，Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature，2000，408(6812)：578-580.

[31] Tian H Q，Chen G S，Zhang C，Melillo J M，Hall C A S. Pattern and variation of C∶N∶P ratios in China's soils：a synthesis of observational data. Biogeochemistry，2010，98(1/3)：139-151.

[32] 赵航，贾彦龙，王秋凤. 中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量统计特征. 第四纪研究，2014，34(4)：803-814.

[33] 青烨,孙飞达,李勇,陈文业,李昕. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析. 草业学报，2015,24(3):38-47.

[34] 贺纪正，张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制. 微生物学通报，2013，40(1)：98-108.

[35] 龚伟，胡庭兴，王景燕，宫渊波，罗承德. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤氮库与微生物的季节变化. 生态学报，2011，31(7)：1763-1771.

[36] 任佐华，张于光，李迪强，肖启明，蔡重阳. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量. 生态学报，2011，31(11)：3232-3238.

[37] 李博，杨持，林鹏. 生态学. 北京：高等教育出版社，2000.

[38] Yuan Z Y，Chen H Y H. Global trends in senesced-leaf nitrogen and phosphorus. Global Ecology and Biogeography，2009，18(5)：532-542.

[39] He M Z，Dijkstra F A，Zhang K，Li X R，Tan H J，Gao Y H，Li G. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability. Scientific Reports，2014，4：6932.

[40] 郭子武，陈双林，杨清平，李迎春. 密度对四季竹叶片 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响. 应用生态学报，2013，24(4)：893-899.